

Instruções Gerais

Prova experimental (20 pontos)

6 de julho de 2026

O incumprimento de qualquer das seguintes regras pode resultar em desqualificação. O exame experimental tem a duração de 5 horas e vale um total de 20 pontos. O início e o fim do exame serão indicados por um anúncio, assim como a passagem de cada hora, indicando o tempo decorrido. Isto será também feito trinta, quinze e cinco minutos antes do fim do exame.

Antes do Teste

Não abra os envelopes ou caixas até que lhe seja indicado. Os seguintes itens são disponibilizados para utilização na mesa: (1) uma caneta, (2) uma calculadora científica.

Durante o exame

- Utilize a caneta fornecida para responder às perguntas.
- Utilize as folhas **A** para as suas respostas finais. Preencha as secções apropriadas com as suas respostas e observações necessárias. Desenhe os gráficos necessários.
- São fornecidas folhas em branco rotuladas com a letra **W** para cálculos intermédios. Use as designadas. Risque com um X as respostas e rascunhos desnecessários que não devam ser classificados. Utilize apenas a frente de cada folha e mantenha limpa a margem junto ao bordo. O verso das folhas não será digitalizado e o seu conteúdo não será tido em consideração.
- As respostas devem ser concisas e legíveis. Utilize equações, operadores lógicos, símbolos e esquemas para expressar as suas ideias claramente. Evite usar textos explicativos, pois os avaliadores podem não ser multilíngues.
- Quantifique a incerteza, salvo indicação em contrário. Deve decidir quantos pontos de dados ou séries de medições são necessários, salvo indicação em contrário.
- Não abandone o seu posto sem autorização. Se precisar de ajuda (ir à casa de banho, buscar água, etc.), levante a placa com o sinal "Ajuda".

No final do exame

- Pare de escrever imediatamente quando for anunciado o fim do exame.
- Coloque todas as folhas no envelope fornecido. Organize-as com a face para cima nesta ordem: Instruções Gerais, Folhas de Perguntas (Q), Folhas de Respostas (A), Folhas de Trabalho (W). Ordene por número de página.
- Os supervisores indicar-lhe-ão quando poderá sair. Não leve nada da sala consigo, incluindo a calculadora.

Agradecemos a sua colaboração.

Instruções específicas

Ao longo do exame, utilize sempre os valores das constantes físicas indicados nas instruções, salvo indicação em contrário. Ao realizar uma série de medições, indique explicitamente nas tabelas os valores medidos e os valores representados nos gráficos. Esteja atento para escrever os algarismos significativos adequados. Todos os gráficos devem mostrar claramente as quantidades envolvidas. Indique sempre as unidades de todos os valores usados.

Gás ideal, pressão de vapor e condução de calor [20 pontos]

Nesta prova experimental irá estudar três fenômenos físicos: o comportamento de um gás ideal, a pressão de vapor da água e a transferência de calor por condução. O objetivo da prova é analisar as relações entre a pressão P , o volume de ar V , a temperatura T e o tempo t , apresentar os seus resultados em gráficos relevantes e estimar as constantes físicas associadas e as respectivas incertezas.

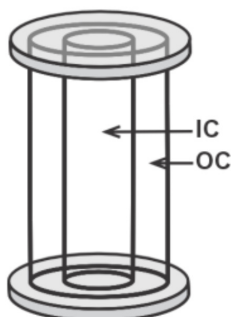


Fig.1a



Fig.1b

Visão geral da montagem experimental

Antes de iniciar a experiência, leia a descrição da montagem, a lista de materiais, as instruções gerais e o procedimento para cada parte da prova.

O aparelho é constituído por dois cilindros concêntricos feitos de acrílico (Fig. 1a). O cilindro interior (doravante designado por **IC**) pode conter ar e líquidos, e o ar no interior do **IC** é designado por ar confinado (doravante designado por **CA**). A quantidade de líquido no **IC** pode ser controlada ligando a seringa ao **tubo D**.

O cilindro exterior (doravante **OC**) só pode ser enchido com água e funciona como uma manga térmica. O seu nível de água pode ser ajustado utilizando tubos e válvulas de entrada e saída, enquanto que a sua temperatura é controlada por um aquecedor elétrico. Estão instalados dois sensores no interior do **IC**: um para a pressão e outro para a temperatura. Existe um sensor de temperatura adicional no **OC**.



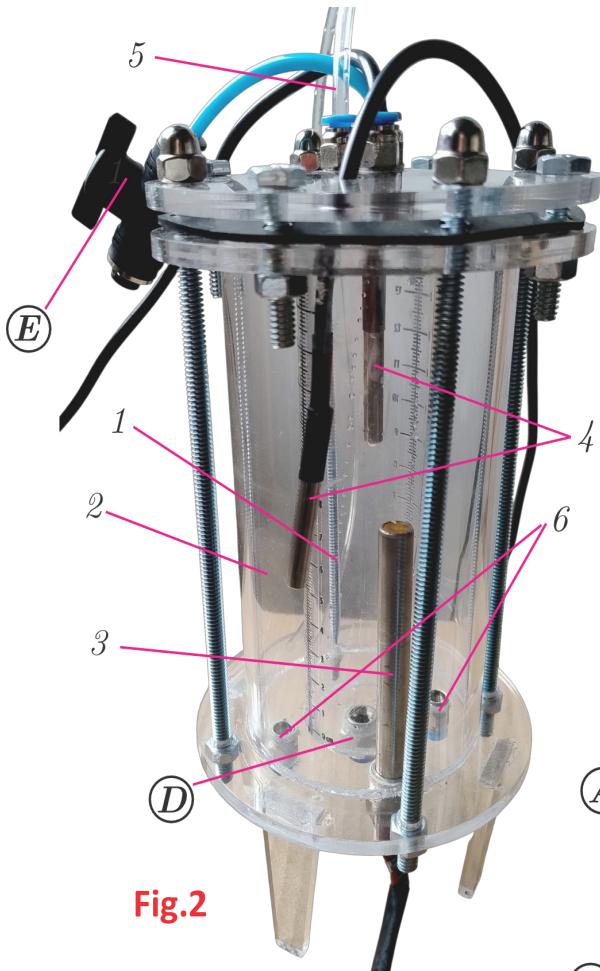


Fig.2



Fig.3



Fig.4



Fig.5

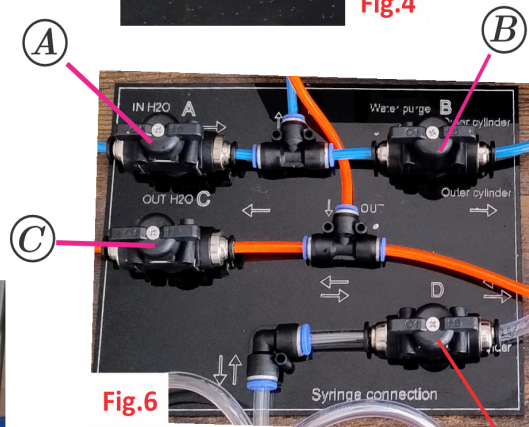


Fig.6

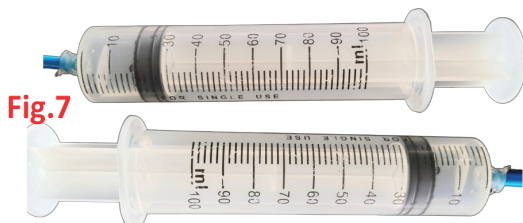


Fig.7



Fig.8

Equipamento Experimental

Aparelho principal (ver Fig. 2)

1. **Cilindro interior (IC):** Graduado com duas escalas em centímetros. As suas tampas fixas mantêm o cilindro hermético.
2. **Cilindro exterior (OC):** Funciona como uma manga térmica.
3. **Aquecedor:** Instalado no **OC** e alimentado pelo módulo eletrónico.
4. **Sensores de temperatura :** Dois sensores, ligados ao módulo electrónico por fios pretos, medem a temperatura em cada cilindro.
5. **Tubo do sensor de pressão:** Liga o **CA** a um sensor de pressão localizado no módulo electrónico, permitindo a medição da pressão interna.
6. **Ligações de água do OC :** Dois tubos fornecem água, com uma entrada para o **OC** e uma saída do **OC**.

Válvula E — Ligação atmosférica do IC: Abre ou fecha a ligação entre o **IC** e a atmosfera.

Módulo Eletrónico (ver Fig. 3)

O módulo eletrónico deve ser ligado à tomada da alimentação elétrica antes de ser utilizado. O interruptor de alimentação, identificado como **Power**, situa-se na parte de trás do módulo (Fig. 4).

O visor digital fornece as seguintes leituras:

- **Pressão interna:** Pressão no interior do **IC** (**INT. PRESSURE**).
- **Pressão atmosférica:** Pressão atmosférica local (**ATM. PRESSURE**).
- **Temperatura interna:** Temperatura no interior do **IC** (**INT. TEMPERATURE**).
- **Temperatura externa:** Temperatura no interior do **OC** (**EXT. TEMPERATURE**).
- **Cronómetro:** Leitura do cronómetro (**TIMER**).

Quatro botões numerados, situados abaixo do ecrã, controlam as principais funções do módulo:

- **Botão 1 — Timer:** Inicia ou pára o cronómetro.
- **Botão 2 — Reset:** Repõe a leitura do cronómetro a zero.
- **Botão 3 — Graph display:** alterna entre a apresentação gráfica e a apresentação numérica.
Esta função não é utilizada nas experiências.
- **Botão 4 — Heater:** Liga ou desliga o aquecedor. Quando o aquecedor está ativo, o indicador animado no canto inferior direito do ecrã alterna de cor entre vermelho e verde.

Nota: Nunca ligue o aquecedor a não ser que este esteja completamente submerso em água. Quando a temperatura do OC atinge os 65 °C, o aquecedor é automaticamente desligado. Este poderá ser reativado apenas quando o indicador deixar de estar vermelho.

O lado direito do módulo (Fig. 5) contém as conexões do sensor de temperatura do IC (**Internal Temp.**), a temperatura do **OC (External Temperature)**, o aquecedor (**Water Heater**), e o tubo que liga o CA ao sensor de pressão (**Internal Pressure**).

Módulo Hidráulico (ver Fig. 6)

O módulo hidráulico contém cinco válvulas, designadas por **A**, **B**, **C**, **D** e **E**. Cada válvula controla um percurso específico do fluido no aparelho:

- **Válvula A — Entrada de água para o OC:** Controla o fluxo de água para o **OC** através do **tubo A (IN H2O)**.
- **Válvula B — Válvula de recirculação:** Controla o fluxo de água através do circuito de recirculação, descrito abaixo nas instruções de operação da bomba.
- **Válvula C — Saída de água do OC:** Controla o fluxo de água para fora do **OC** através do **tubo C (OUT H2O)**.
- **Válvula D — Ligação à seringa:** Controla a entrada e saída de fluidos no **IC** utilizando a seringa ligada ao **tubo D** (Fig. 2). Se a válvula tiver fugas, pode desligar o tubo do sistema e ligar a seringa diretamente ao tubo.

Operação da Bomba e das Válvulas

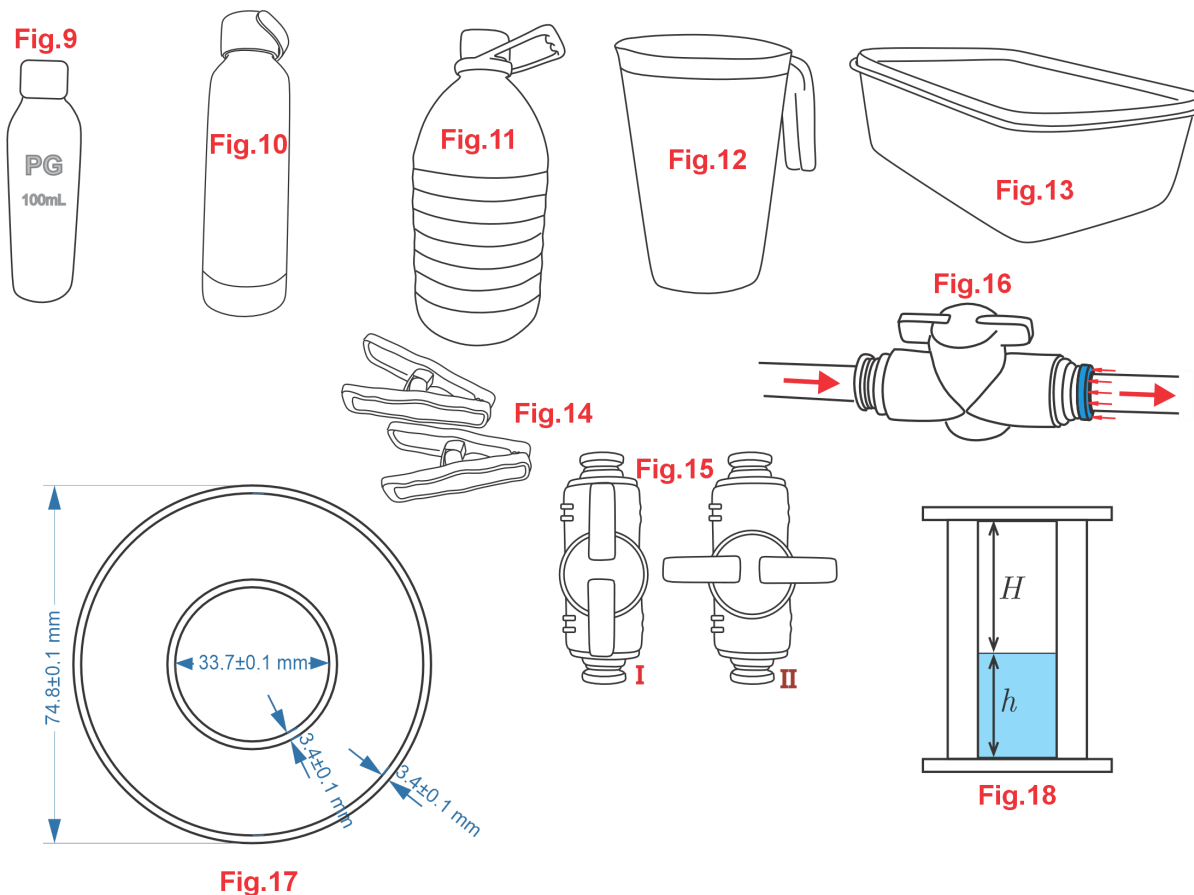
O interruptor da bomba (**PUMP**), localizado na parte frontal do módulo eletrónico (Fig. 8), ativa a bomba no interior deste. Antes de ligar a bomba, configure as válvulas de acordo com a operação que pretende realizar. Utilize as molas para fixar os tubos à borda dos recipientes antes de operar a bomba.

- **Encher o OC com água:** Abra a **válvula A** e feche as **válvulas B** e **C**. Coloque o **tubo A** num recipiente com água. Quando o nível desejado for atingido, feche a **válvula A**. Certifique-se de que o nível da água permanece pelo menos 1 cm abaixo da tampa do cilindro. *Se a água não entrar no OC de forma eficiente, abra e feche imediatamente a **válvula B** para purgar a bomba.*
- **Drenar a água do OC:** Feche a **válvula A** e abra as **válvulas B** e **C**. Coloque o **tubo C** num recipiente para recolher a água.
- **Uniformizar a temperatura do OC:** Abra a **válvula B** e feche as **válvulas A** e **C**. Nesta configuração, a água circula pelo **OC** em circuito fechado, contribuindo para uniformizar a

temperatura.

Para as seguintes operações, ligue a seringa ao **tubo D**. A bomba não é utilizada nestes casos.

- **Adicionar líquido ao IC:** Abra as **válvulas D e E**, e utilize a seringa para introduzir o líquido.
- **Remover líquido do IC:** Abra as **válvulas D e E**, e utilize a seringa para extrair o líquido.



Materiais Adicionais: os seguintes materiais são fornecidos para a experiência.

- **Duas seringas de 100 mL** com respectivo tubo de ligação (Fig. 7). Uma seringa é para água, a outra para **PG**.
- **Propilenoglicol (PG):** Um recipiente com 100 mL de **PG**, cuja pressão de vapor é desprezável na gama de temperaturas utilizada nesta experiência (Fig. 9). **Aviso: o PG é miscível com água.** Pode também hidratar-se se exposto ao ar. Recomenda-se que mantenha o recipiente fechado quando não estiver a utilizá-lo.
- **Água fria:** Um recipiente térmico com 500 mL de água fria (Fig. 10).
- **Água à temperatura ambiente:** Uma garrafa de água à temperatura ambiente (Fig. 11).

- **Recipiente de vazamento:** Um recipiente utilizado para verter água (Fig. 12).
- **Jarro para excesso de água:** Um jarro para recolher o excesso de água (Fig. 13).
- **Molas:** Para fixar os tubos e suportar componentes durante a experiência (Fig. 14).
- **Toalhas de papel** para limpeza.

Notas Operacionais Importantes

Tenha em atenção as seguintes notas ao montar e operar o dispositivo:

- **Posições das válvulas:** Cada válvula tem apenas duas posições: aberta (**I**) e fechada (**II**) (Fig. 15).
- **Ligação dos tubos:** Para remover um tubo, empurre o anel para fora e puxe o tubo. Para inserir um tubo, empurre-o até encaixar (Fig. 16). **Note que o aparelho está totalmente montado no início do exame e que em princípio os tubos não precisam ser reconectados no funcionamento normal do aparelho.**
- **Dimensões do cilindro:** A Figura 17 mostra as dimensões da secção transversal dos cilindros.
- **Notação:** A Figura 18 define a notação utilizada para o conteúdo do **IC**: h é a altura do líquido, e H é a altura do ar acima do líquido.
- **Correções de volume:** O volume interno dos tubos de ligação é aproximadamente compensado pelo volume do sensor de temperatura no interior do **IC**. Por conseguinte, estes efeitos devem ser desprezados.

Constantes e Valores de Referência

As seguintes constantes e valores de referência devem ser utilizados ao longo da experiência:

- **Constante de Avogadro:** $N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
- **Calor específico da água:** $c_0 = 4.184 \times 10^3 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$
- **Densidade da água:** $\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$
- **Massa molar da água:** $M_0 = 18.02 \text{ g/mol}$
- **Massa molar do ar:** $M_a = 28.96 \text{ g/mol}$
- **Volume molar de um gás ideal em condições normais:** $V_m = 22.4 \text{ L/mol}$, para $T_0 = 273.15 \text{ K}$ e $P_0 = 101.3 \text{ kPa}$

Parte A [4,0 pontos]. Processo isocórico (isovolumérico) de um gás ideal

O **CA** obedece à equação de estado dos gases ideais,

$$PV = nRT \quad (1)$$

onde R é a constante dos gases ideais.

Procedimento

Introduzir **PG** em **IC** até $h = 4,5$ cm e fechar as válvulas **D** e **E**. Isto garante que o volume de **CA** é fixo.

A densidade do ar ambiente em Bucaramanga varia com a temperatura e pressão locais. Para a seguinte questão, utilize o valor médio de $\rho = 1,12$ kg/m³.

A1. [0,4pt] Determine a massa m , o número de moles n e o número total de moléculas de ar N do **CA**.

1. Encha o **OC** com água à temperatura ambiente quase até ao topo.
2. Ligue o aquecedor. Não se esqueça de uniformizar a temperatura utilizando a bomba de circulação de água.

A2. [1 pt] Registe numa tabela a pressão P do CA em função da sua temperatura T .

A3. [0,9pt] A partir dos dados obtidos na questão A2, represente graficamente o comportamento da pressão em função da temperatura.

Nas condições de competição da IPhO, os sensores podem ser intencionalmente descalibrados para alterar o valor esperado de R em relação ao valor de referência.

A4. [1,0pt] Use o gráfico de A3 para determinar o valor experimental de R .

O coeficiente de pressão térmica a volume constante é definido pela relação:

$$\beta_0 = \frac{1}{P_0} \left(\frac{\Delta P}{\Delta T} \right), \quad (2)$$

onde P_0 é a pressão do sistema a uma temperatura de referência T_0 , conforme indicado nas constantes e valores de referência.

A5. [0.7pt] Determine o valor do coeficiente β_0 para o ar.

Retire o PG do IC antes de prosseguir para as outras partes. Se prosseguir para a parte B, não retire a água quente do OC.

Parte B [8,0 pt]. Pressão de Vapor

Num recipiente fechado contendo um líquido e o seu vapor em equilíbrio, a dependência da pressão de vapor com a temperatura absoluta T é dada pela equação de Clausius–Clapeyron:

$$P_v = P_{v0} e^{-\frac{Q_v}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (3)$$

Aqui, T_0 é a temperatura de referência, tomada como 0 °C. P_{v0} é a pressão de vapor em T_0 , R é a constante universal dos gases, e Q_v é o calor latente molar de vaporização da água.

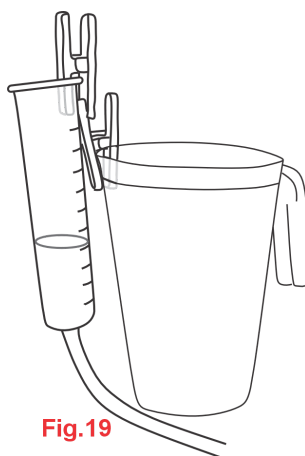


Fig.19

Procedimento

Lembre-se de que o PG e a água são miscíveis. Utilize seringas diferentes para a água e o PG

- Encha o **OC** com água até que o nível da água esteja próximo do topo.
- Encha uma seringa com água, conecte-a ao **IC** e abra a válvula **E**, remova o êmbolo da seringa e eleve a seringa até atingir o nível da água em $h = 5,0$ cm. Feche a válvula **E** e fixe a seringa ao jarro conforme mostrado na Figura 19. Esta disposição mantém a pressão no interior do **IC** aproximadamente igual à pressão atmosférica. Certifique-se de que não ficam bolhas de ar no tubo.

- Aqueça a água no **OC** até 65 °C. Recorde que se utiliza o sistema de recirculação para uniformizar a temperatura da água.
- Aguarde até que a temperatura comece a diminuir para iniciar o registo de H em função de T .
- Para baixar ainda mais a temperatura, pode substituir, no momento adequado, a água no **OC** pela água fria fornecida.

B1. [1,0 pt] Registe a altura H em função da temperatura T numa tabela

B2. [1.0 pt] Utilize os dados obtidos em B1 para traçar o gráfico de H em função de T .

A pressão de vapor é relativamente pequena à temperatura ambiente pelo que a curva $H(T)$ pode ser aproximada a uma reta.

B3. [0,5 pt] Use o gráfico da questão B2 para extrapolar o valor de H a 0 °C.

B4. [1.0 pt] Assumindo que **IC** contém tanto ar seco como vapor de água, deduza uma expressão algébrica para a pressão de vapor P_v em função de P_{atm} (pressão atmosférica), H_0 (H para $T=0$ °C), H , T_0 e T . Para efeitos deste problema, pode assumir que a pressão de vapor a 0°C é zero.

Para as questões seguintes, utilize o valor de referência $R = 8,31 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$.

B5. [4,0 pt] Utilizando a equação (3) e a expressão da questão B4, construa um gráfico adequado para determinar o valor experimental de Q_v .

B6. [0,5 pt] A partir do valor de Q_v , determine o calor latente de vaporização por unidade de massa L_v , indicando a fórmula que utilizou.

Parte C [8,0 pt]. Condução de Calor

Nesta parte da prova, irá estudar a troca de calor entre a água no **OC** e a água no **IC** através da parede que os separa. Ao analisar a evolução temporal da temperatura da água no **IC**, T_{IC} , e da temperatura da água no **OC**, T_{OC} , o objetivo desta secção é estimar a condutância térmica efetiva da parede, a temperatura de equilíbrio do sistema e a condutividade térmica do acrílico.

A condução de calor através de uma parede sólida segue a relação:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{1}{R_{Th}}(T_{OC} - T_{IC}) \quad (4)$$

onde ΔQ é o calor recebido pela água no **IC** através da parede durante o intervalo de tempo Δt . A resistência térmica efetiva R_{Th} depende do material e da geometria da parede que separa o **IC** e o **OC**.

Procedimento

1. Defina o nível da água no **OC** para $h = 15$ cm.
2. Aqueça a água no **OC** até 65 °C. Utilize a bomba para uniformizar a temperatura da água.
3. Defina o nível da água no **IC** para $h = 10$ cm e inicie o cronômetro.

C1. [1.0 pt] Registre a temperatura interna T_{IC} e a temperatura externa T_{OC} em função do tempo t

C2. [1.0 pt] Num único gráfico, represente T_{IC} e T_{OC} em função do tempo t .

Para as questões C3 e C4, ignore a capacidade calorífica do aparelho. T_{eq} refere-se à temperatura de equilíbrio que seria atingida tanto pelo IC como pelo OC se não houvesse transferência de calor para o ambiente.

C3. [0,7 pt] Represente graficamente $T_{OC} - T_{IC}$ em função de T_{OC} e T_{IC} no mesmo gráfico, com T_{OC} e T_{IC} juntas no mesmo eixo de temperatura e $T_{OC} - T_{IC}$ no outro eixo.

C4. [1.1 pt] A partir dos gráficos construídos em C3, determine T_{eq} . Não é necessário calcular a incerteza para esta questão.

Se as variáveis forem medidas um número finito de vezes, a Equação (4) pode ser expressa como

$$\frac{T_{IC,j} - T_{IC,(j-1)}}{t_j - t_{j-1}} \propto \bar{T}_{OC} - \bar{T}_{IC} \quad (5)$$

onde j representa o número da medição e $\bar{T}$ são as temperaturas médias em cada cilindro durante o intervalo t_{j-1} a t_j

C5. [1.0 pt] Represente graficamente a expressão do lado esquerdo da Equação 5 em função da expressão do lado direito

C6. [1.6 pt] Determine o valor de R_{Th} a partir do gráfico construído em C5.

A lei de Fourier para a condução de calor radial através de uma parede cilíndrica fina pode ser escrita como:

$$\frac{dQ}{dt} = -\lambda A \frac{dT}{dr} \quad (6)$$

onde A é a área da parede, λ é a condutividade térmica do material da parede, e r denota a distância ao eixo do cilindro.

C7. [1,6 pt] Utilizando as equações (4) e (6), determine o valor λ da condutividade térmica do acrílico (o material que separa IC e OC), indicando a fórmula que utilizou.